

【研究論文】

大阪湾の傾斜護岸帯における藻場の現存量とその変動要因

——関西国際空港護岸における事例——

米田 佳弘^{1*}・吉田 司²・芝 修一²・松井 光市³
金子 健司⁴・鈴木 輝明⁵・高 培 昭 洋⁶

Fluctuation in Standing Stock of Seaweed Beds Formed on a Sloped Seawall Reef and its Associating Environmental Factors in Osaka Bay

—— A Case Study in the Seawalls of the Kansai International Airport Islands ——

Yoshihiro YONEDA^{1*}・Tsukasa YOSHIDA²・Shuichi SHIBA²・Koichi MATSUI³
Kenji KANEKO⁴・Teruaki SUZUKI⁵ and Teruhiro TAKEBE⁶

Abstract

Along the Kansai International Airport islands, which are two artificial contiguous islands in the eastern area of Osaka Bay, a large-scale sloped seawall suited for seaweed bed development was constructed for the first time in Japan. The degree of coverage and areas of seaweed vegetation were monitored from 1989 to 2010. However, the change in standing stock of seaweed was not followed in the monitoring program. We conducted a new survey to convert the seaweed coverage data to standing stock for evaluation of the ecological functions of seaweed beds formed on the seawalls of the airport islands. The result showed that the total surface coverage of the airport island seawalls in 2010 was approximately 2.5 times higher than in 1999 but the total standing stock in 2010 was only approximately 1.4 times higher than in 1998. This is thought to be attributed to the significant decrease of *Ecklonia* that had been growing thickly near the first airport island, caused by reduced current speed and wave flows due to the second island.

The annual production from the surface area of seawalls in 2010 is estimated at 44,680 kgC/y, 2,992 kgN/y, and 181 kgP/y, respectively. We estimate that 18% of the annual carbon absorption of seaweed beds that was lost in Osaka Bay in the past is absorbed by the sloped seawall area near the airport islands. The annual production from the slightly sloped seawalls (per unit area) in terms of carbon, nitrogen, and phosphorus is approximately 9, 7, and 8 times higher than that of vertical seawalls, respectively. In terms of the cost of constructing a sewage treatment facility, we estimate that converting vertical seawalls to sloped seawalls for a distance of 1 km would yield benefits of 8.2 million yen per annum in terms of nitrogen treatment amount and 4.5 million yen in terms of phosphorus treatment amount.

2013年3月4日受付, 2013年5月8日受理

キーワード: 大阪湾, 傾斜護岸帯, 藻場, 現存量, 水質浄化機能

Key words: Osaka Bay, sloped seawall reef, seaweed beds, standing stock, water quality improvement function.

¹ Fisheries Division, Department of Environment, Agriculture, Forestry and Fisheries, Osaka Prefectural Government, 1-14-16 Nankokita, Suminoe, Osaka, Osaka 559-8555, Japan (大阪府環境農林水産部水産課 〒559-8555 大阪府大阪市住之江区南港北1-14-16)

² Chateau Marine Survey Co., Ltd., 1-4-2 Katamati, Miyakozima, Osaka, Osaka 534-0025, Japan (株式会社シャトー海洋調査 〒534-0025 大阪府大阪市都島区片町1-4-2)

³ New Kansai International Airport Engineering Co., Ltd., 1 Senshu-kuko kita, Izumisano, Osaka 549-0001, Japan (新関西国際空港エンジニアリング株式会社 〒549-0001 大阪府泉佐野市泉州空港北1)

⁴ Graduate School of Agricultural Science, Tohoku University, 1-1 Tsutsumidori-Amamiya, Aoba, Sendai, Miyagi 981-8555, Japan (東北大学大学院農学研究科 〒981-855 宮城県仙台市青葉区堤通雨宮町1-1)

⁵ Graduate School of Environmental and Human Sciences, Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan (名城大学大学院総合学術研究科 〒468-8502 愛知県名古屋市中区塩釜口1-501)

⁶ Research Institute of Meijo University, 1-501 Shiogamaguchi, Tempaku, Nagoya, Aichi 468-8502, Japan (名城大学総合研究所 〒468-8502 愛知県名古屋市中区塩釜口1-501)

* Tel: 06-6210-9613, Fax: 06-6210-9611, YonedaYo@mbox.pref.osaka.lg.jp

1. はじめに

日本の沿岸域の藻場は開発や海域環境の悪化により1978年 ($2.08 \times 10^9 \text{m}^2$) から1998年 ($1.46 \times 10^9 \text{m}^2$) にかけて $6.2 \times 10^8 \text{m}^2$ が失われ、この傾向は現在も続いている¹⁾。

日本の代表的内湾の一つである大阪湾では、1978年に $6.44 \times 10^6 \text{m}^2$ の藻場が存在していたが、その後、急速に減少し、1990年時点で大阪府南部沿岸域や友ヶ島、淡路島沿岸域に現存するのみであり、その全面積は $4.34 \times 10^6 \text{m}^2$ である²⁾。過去の埋め立てに伴い形成された人工護岸は、その経済的合理性や海面利用の効率性から直立護岸がほとんどで、その側面には海藻の生育に必要な光量がほとんど供給されず、藻場の成立には極めて不利な構造であった。

本研究の研究対象である関西国際空港は、大阪湾東側海域の泉州沖5kmの海上、水深-18~-20mの地点に位置し、その外周では日本で初めて海底から人工的に盛砂や捨石を1:4/3あるいは1:3/2という傾斜を持たせて積み上げた大規模な傾斜護岸が採用された。さらに護岸表面を自然石により被覆したり、海藻の遊走子の着生を促進する構造となっている消波ブロックを設置したりして、海藻の生育を促進する大規模な傾斜護岸帯が出現した。

この傾斜護岸帯に形成された藻場の推移については、

1989年から2010年までの22年間継続してモニタリングが行われてきた。しかし、これまでの長期モニタリングでは、形成された藻場の面積と、その藻場における海藻の植生被度のみが観察対象とされ^{3)~6)}、藻場の持つ多様な生態系機能を評価するための基礎となる現存量が把握されてこなかった。そこで本研究は、2011年3月に新たに藻場を構成する海藻別の植生被度と単位面積あたりの湿重量との関係を求め、その結果をもとに、長期モニタリングで把握された藻場の推移を現存量の変化として明らかにした。また、現存量および護岸の位置と構造、周辺の海域環境から藻場の繁茂により効果的な傾斜護岸帯の条件を明らかにした。さらに、現存量から藻場の年間生産量を推測し、水質浄化機能に関する経済的効果についても評価した。

2. 材料と方法

1) 調査地点

調査地点である関西国際空港は、大阪湾の東側海域、大阪府泉州沖5kmの水深-18~-20mに造成された工期の異なる2つの空港島（以降、1期島、2期島と呼ぶ）からなる（Fig. 1）。1期島は1988年12月に、2期島は2001年11月にそれぞれ護岸が概成した。

1期島は幅1,250m、長さ4,370m、2期島は幅1,345m、

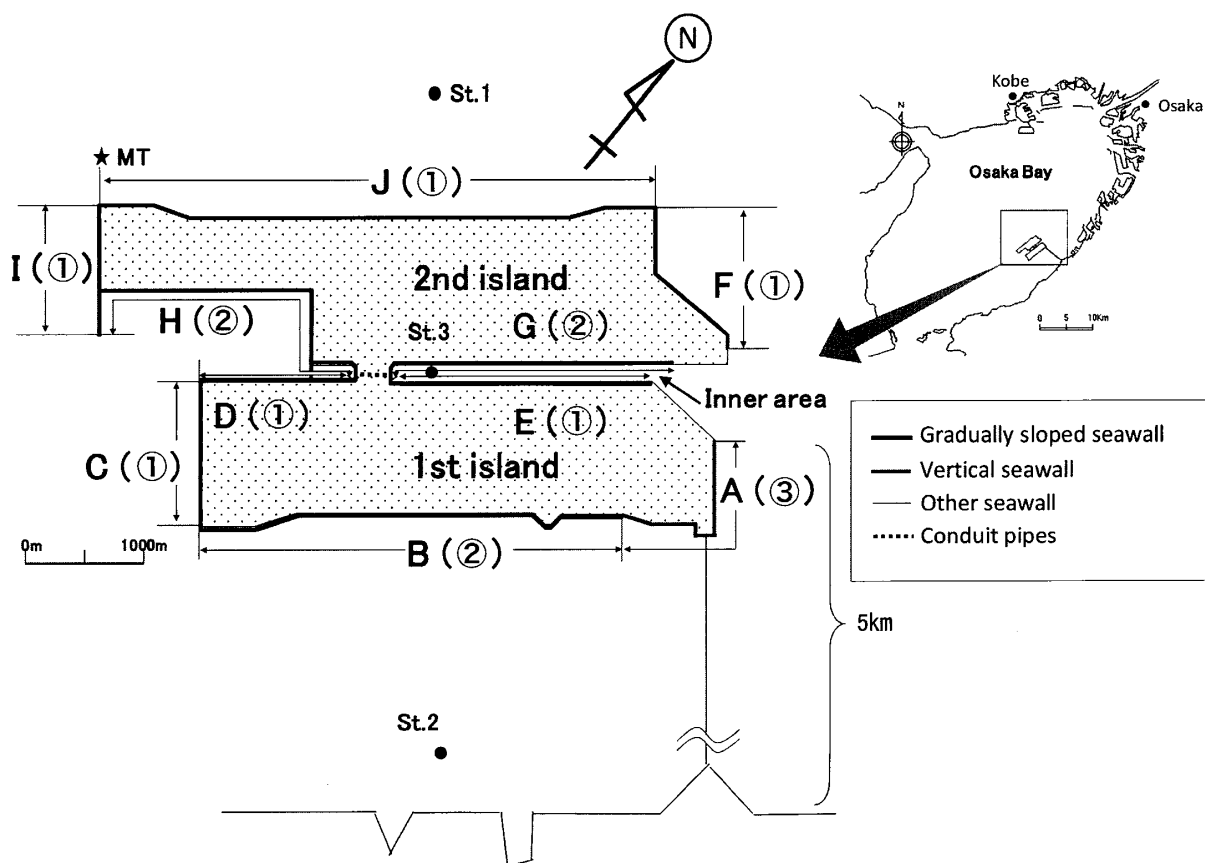


Fig. 1 Location and configuration of Kansai International Airport islands, and seawalls subject to surveys. Roman numerals in parentheses of seawalls A-J correspond to the seawall types shown in Fig. 2 (cross section). Bullets and stars represent environmental survey points in the waters.

長さ5,400mであり、この間は、幅200m、奥行き2,600mの細長い水面となっている（以降、内部水面と呼ぶ）。内部水面の南西端には、1期島と2期島を繋ぐ航空機の連絡誘導路が造られ、D.L. -12m付近で直径2.5mの通水管2本により、空港島南西側に開いた水面とつながっている。この南西側の水面（以降、波除堤内水面と呼ぶ）は幅847m、奥行き2,162mの水域であり、外海とは426mの波除堤により一部仕切られている。

空港島の護岸を形状と造成位置によりA~Jの10護岸に区分した（Fig. 1）。空港島の護岸の形状には、Fig. 2に示した①~③の3タイプ（以降、①~③と呼ぶ）がある。①は海面からD.L. -6~-9m付近まで消波ブロックが設置され、C, D, E, F, I, J護岸がこのタイプである。②は消波ブロックの設置がなく、自然石で被覆された状態となっており、B, G, H護岸がこのタイプである。③は直立護岸であり、A護岸がこのタイプである。①と②はD.L. -6~-9m付近で幅約5~10mの水平部（小段部）となり、それ以深は再び海底へ向かった傾斜護岸である。E, G護岸は内部水面に面している。なお、D, E護岸は2期島造成に伴い連絡誘導路が建設される前は連続した護岸であった。

空港島周辺海域での50年確率波は、西北西から南西の波向で3.0~3.5m、東北東から北の波向で1.6~2.1m、南南東から東の波向で1.2~1.5mであり、西方向からの波

動流動が強く、東方向からの波動流動は弱い⁷⁾。また、内部水面のG護岸の50年確率波は0.7m、波除堤内水面のH護岸は1.8mであり、内部水面における波動流動は極めて弱い⁸⁾。

2) 藻場の分布観察調査

1989~2010年の22年間、毎年3月に藻場の分布状況を観察した。分布状況は、空港島全護岸の100mごとに岸沖方向の測線を設定し、測線に沿ってスキューバ潜水によりD.L. + 1 mから海藻の分布下限となるD.L. -10m付近（小段部沖合縁辺）まで観察した。観察は測線を挟む左右5 m、幅10mで行い、海藻種ごとの植生被度を水深1mごとに、濃密生（81~100%）5、密生（51~80%）4、疎生（21~50%）3、点生（5~20%）2、痕跡程度（5%未満）1の5段階にランク⁴⁾し、その値を測線の左右50m、幅100mの代表値とした。観察は全護岸で行い、2010年の測線数は238本であった。

この間、護岸造成の進捗に合わせて、1988~1990年に1期島の一部護岸でカジメ（*Ecklonia cava*）などの大型海藻の人工種苗の移植が行われた⁵⁾。また、2001~2002年に2期島の一部護岸でカジメなどの成熟葉を入れたネット袋を用いた種苗供給が行われた⁶⁾。

3) 植生被度ランクから現存量への変換

生育面積が広い主要な大型海藻種は、カジメ属（*Ecklonia* spp.）、ワカメ（*Undaria pinnatifida*）、シダモク（*Sargassum filicinum*）、ヨレモクモドキ（*S. yamamotoi*）であったことから、これら4海藻が優占する藻場を対象とし植生被度から現存量への変換を行った。なお、カジメ属の優占種はカジメであるが、クロメ（*Ecklonia kurome*）も存在している。これら大型海藻の被度は3月に最大になっており⁶⁾、植生被度ランクから現存量への変換のための調査は、2011年3月にB, I, J護岸の合計100箇所で行った。各測点で1×1mのコドラートを設置して、これらの海藻の枠内の植生被度ランクを記録した後、枠内の4海藻を刈り取り、湿重量を測定した。得られた結果を基に、植生被度ランクと単位面積あたりの湿重量との関係式を求めた。

同時に4海藻について3株を採取して、葉状部を水洗いし表面の付着物を除去した後、乾燥機で約80℃、24時間乾燥し粉末にし、乾湿重量比を求めた上で炭素（C）、窒素（N）、リン（P）の含有量を測定した。C, N含有量はCHNコーダー（MT-700HCN、ヤナコ分析工業社製）により、P含有量は、硝酸および硫酸により酸化分解後、モリブデン青吸光度法⁹⁾により分析した。

4) 藻場の現存量分布

各護岸の幅100m、水深1mごとの表面積にその観察範囲に対応した種類別4海藻の植生被度ランクを3)で求めた関係式から現存量に換算し、1989~2010年の年ごとの空港島全体の現存量を求めた。また、各護岸間の現存量

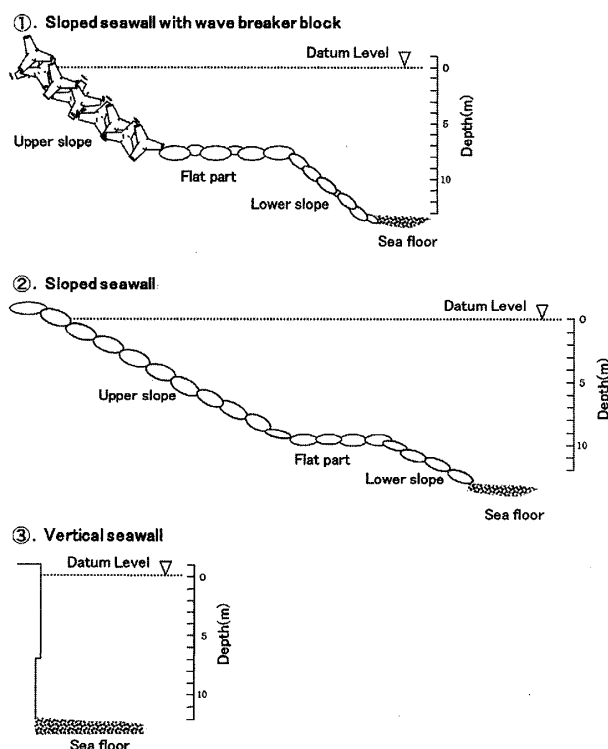


Fig. 2 Cross section of airport island seawalls.

①. C, D, E, F, I, and J are sloped seawalls with wave breaker blocks. ②. B, G, and H are sloped seawalls without wave breaker blocks. ③. A is a vertical seawall.

の比較およびそれぞれの環境との関連を検討するため、各護岸別の総現存量を総護岸表面積で除し、各護岸の1m²あたりの現存量を求めた。さらに、単位護岸施工距離が持つ水質浄化機能の経済的評価を行うため、護岸の水平距離でも除し、各護岸の長さ1mあたりの現存量も求めた。

藻体のC, N, P量は、4海藻の現存量にそれぞれの乾湿重量比を乗じて乾重量とし、これにそれぞれのC, N, Pの平均含有量を乗じることにより求めた。

5) 海域環境調査

各護岸間の現存量の相違の要因を検討するため海域環境調査を実施した。項目は、水温、塩分、pH、クロロフィルa濃度、浮遊物質（SS）、溶存態無機窒素（DIN；硝酸態窒素、亜硝酸態窒素、アンモニア態窒素の合計）、溶存態無機リン（DIP）の水質項目および光量子束密度、流向・流速とした。水質および光量子束密度の測定点は、Fig. 1に示すSt.1（2期島北西側）、St.2（1期島南東側）およびSt.3（内部水面）であり、2006年5月～2009年2月の3年間に測定した年4回（5月、8月、11月、2月）のデータを用いた。水温、塩分、pH、クロロフィルa濃度は、海面下1m層で、多項目水質計（クロロテックACL-1183、アレック電子社製）により、SS、DIN、DIPは、上記の項目と同じ水深層で北原式採水器により採水、分析した。SSは昭和46年環境庁告示第59号付表8（1999年2月22日）により、DINのうち硝酸態窒素は銅・カドミウムカラム還元・ナフチルエチレンジアミン吸光光度法⁹⁾、亜硝酸態窒素はナフチルエチレンジアミン吸光光度法⁹⁾、アンモニア態窒素はインドフェノール青吸光光度法⁹⁾により、DIPはモリブデン青吸光光度法⁹⁾により分析した。光量子束密度は、海面直上と海面下1m, 3m, 5m, 7m層で光量子束密度計（LI-1000, LI-COR社製）により測定し、海面直上の光量子束密度を100%とした海面下1m, 3m, 5m, 7m層の相対光量子量（Relative photon flux；以降、Rpfと呼ぶ）で表した。

流向・流速は、2期島の南西側沖合の海上観測塔（Fig. 1：以降、MT局と呼ぶ）および水質項目と同じ測定点のSt.2, St.3の連続測定データを用いた。MT局の観測は多層流向流速計（ワークホースADCP, センチネル, RD Instruments社製）により1988～2010年の期間で10分ごとに連続測定が行われたが、本研究では2010年7月6日～7月21日までの15日間のD.L.-1mのデータを用いた。St.2およびSt.3では、海面下1m層に設置された電磁流向流速計（コンパクトEM, アレック電子社製）により、それぞれ2006年7月20日～8月4日、2010年7月6日～7月21日までの15日間で10分ごとに観測された。

水質項目およびRpfを地点間で比較するため、二元配置分散分析およびTukeyの多重比較検定により、各地点の平均値の有意差（ $p < 0.05$ ）を判定した。解析には統計

ソフトStatcel 2を用いた¹⁰⁾。

3. 結 果

1) 植生被度ランクから現存量への変換

2011年3月の主要4海藻の植生被度ランクと計測した1m²あたりの湿重量との関係式をFig. 3に示した。カジメ属、ワカメ、シダモク、ヨレモクモドキの植生被度ランクと1m²あたりの湿重量の決定係数（ R^2 ）は、それぞれ0.80, 0.89, 0.95, 0.80であった。求めた関係式を用いて、取得した被度データを現存量に変換した。

Fig. 4に最も優占したカジメ属の2010年3月の植生被度ランク分布と換算現存量分布の例を示した。

2) 藻場の現存量の経年変化

1期島の護岸上の海藻の総現存量（Fig. 5a）は、モニタリング開始時の1989年（総護岸表面積0.19km²；以降、面積と呼ぶ）は15.0ton w.w.であり、一年生のシダモクが99%以上（14.9ton w.w.）を占めていた。1993年（面積0.24km²）頃から多年生のカジメ属、一年生のワカメが徐々に増加しはじめ、1997年（面積0.24km²）には総現存量は246.4ton w.w.に増加し、カジメ属が49%（120.7ton w.w.）と優占種となり、ついでワカメが32%（78.2ton w.w.）であり、シダモクは19%（47.5ton w.w.）に低下した。その後のカジメ属の急速な増加により、1998年（面積0.24km²）の総現存量は388.1ton w.w.と最大に達し、カジメ属が58%（225.0ton w.w.）、次いでワカメが23%（90.4ton w.w.）を占め、シダモクは19%（72.3ton w.w.）であった。しかし、1999年7月から始まった2期島造成工事が進行した時期に総現存量の減少が続き、2005年（面積0.30km²）の総現存量は94.1ton w.w.と2期島造成以降で最小となり、カジメ属が44%（41.1ton w.w.）と相対的に減少する一方で、ワカメが38%（35.9ton w.w.）と増加し、シダモクは16%（14.9ton w.w.）と変わらなかった。その後は1期島の総現存量は大幅には回復せず、2010年（面積0.33km²）は189.7ton w.w.で、カジメ属が27%（51.5ton w.w.）に減少し、ワカメが41%（78.7ton w.w.）、一方シダモクは27%（51.5ton w.w.）に増加した。2010年の総現存量は、2期島造成工事着手前の最大現存量を示した1998年の総現存量388.1ton w.w.と比べると49%に大きく減少した。その減少はカジメ属の現存量が、1998年の225.0ton w.w.から2010年の51.6ton w.w.へ1/4以下に激減したことに起因しており、1期島の現存量の推移は、カジメ群落の消長に大きく左右されていた。

2期島の海藻の総現存量（Fig. 5b）は、モニタリングが開始された2003年（面積0.24km²）は122.8ton w.w.であり、一年生のシダモクが88%（107.5ton w.w.）を占めていた。2004年（面積0.34km²）の総現存量はカジメ属の著しい増加により272.1ton w.w.となり、カジメ属が53%（144.2ton w.w.）を占め、シダモクは42%（115.6ton w.w.）

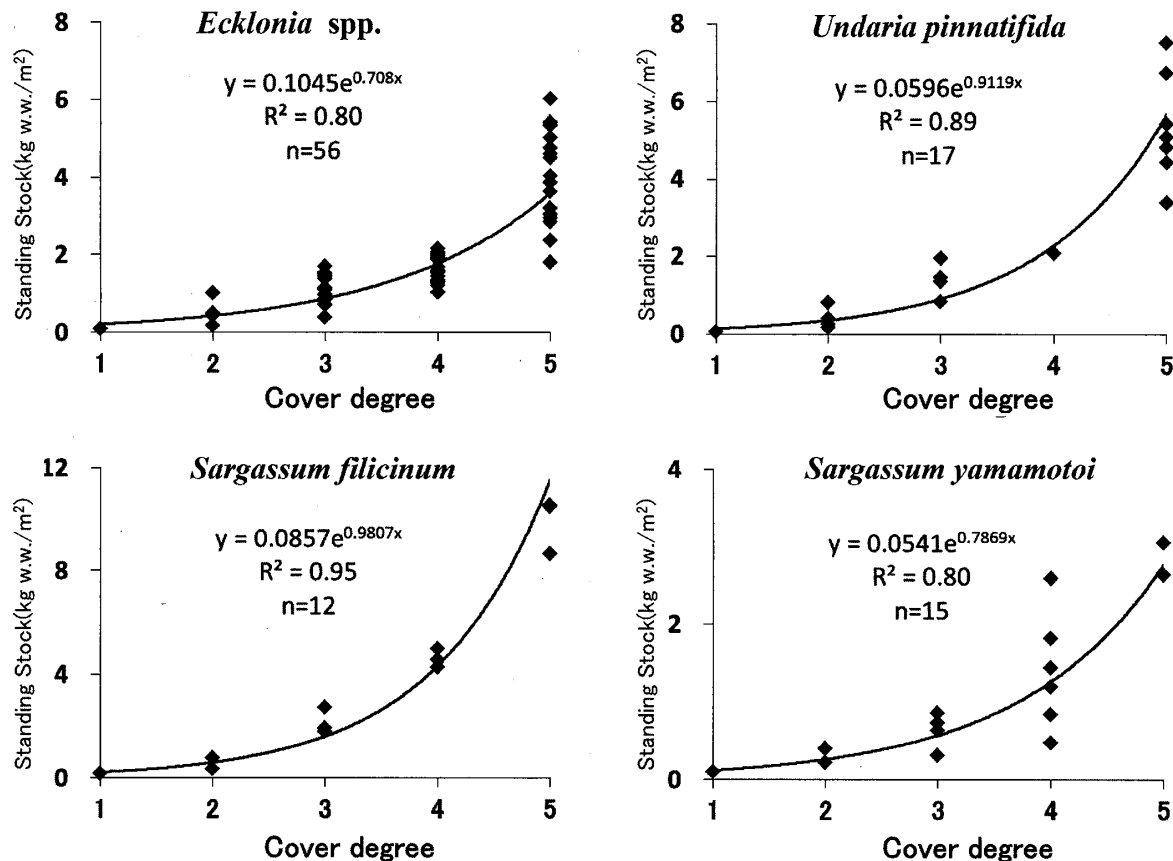


Fig. 3 Distribution of degree of *Ecklonia* spp. vegetation coverage and distribution of converted standing stock in March 2011.

に減少した。2005年（面積0.36km²）には総現存量はいったん減少したが、その後再び急速に増加し、2009年（面積0.39km²）には406.2ton w.w.と2期島でモニタリングを開始して以来最大に達し、そのうちカジメ属が52%（211.8ton w.w.）、次いでワカメが25%（102.9ton w.w.）を占め、シダモクは17%（69.1ton w.w.）に低下した。2010年（面積0.39km²）の総現存量は356.4ton w.w.とやや減少したが、カジメ属、ワカメ、シダモクの割合は2009年とほとんど変わらなかった。

空港島全体の総現存量をFig. 5cに示した。2010年（面積0.72km²）の総現存量は546.1ton w.w.で、カジメ属が42%（231.6ton w.w.）、ワカメが30%（166.4ton w.w.）、シダモクが20%（110.4ton w.w.）、ヨレモクモドキが8%（37.7ton w.w.）であった。

3) 各護岸の現存量の経時変化

2010年の空港島の総護岸表面積（面積0.72km²）は、2期島造成前の1期島護岸表面積（面積0.29km²）に比べ約2.5倍になったが、2010年の海藻の総現存量（546.1ton w.w.）は、1期島の最大現存量（388.1ton w.w.）に比べ約1.4倍にとどまっている。これは2期空港島造成以降の1期島の現存量の減少によっている。この減少要因を検討するため、各護岸の1m²あたりの現存量を求めた。比較は、2期造成工事開始直前の1999年、2期モニタリング開始から4年後の2006年、さらに4年後の2010年で行い、

Fig. 6に示した。

1999年の1期島で最大の現存量を示したのは南西に向いたC護岸（①）、北西に向いたD、E護岸（①）で1.00kg w.w./m²であった。そのうちD、E護岸のカジメ属の現存量は0.58kg w.w./m²であり、B護岸（②）に比べ3倍以上大きかった。2006年になると、波除堤内水面に位置することとなったD護岸は0.73kg w.w./m²、内部水面に位置することとなったE護岸は0.32kg w.w./m²に激減し、そのうちカジメ属はそれぞれ0.18kg w.w./m²、0.09kg w.w./m²となり、1999年のそれぞれ1/3、1/6となった。D、E護岸のカジメ属の現存量は、B護岸、C護岸のカジメ属の現存量と同程度であった。一方、2期島建設に伴い造成されたI、J護岸（①）では、それぞれ1.64kg w.w./m²、1.35kg w.w./m²の藻場が新たに形成され、カジメ属の現存量は、それぞれ0.87kg w.w./m²、1.00kg w.w./m²であり、1999年のD護岸、E護岸を大きく上回った。新たに造成された内部水面に位置するG護岸（②）の現存量は0.13kg w.w./m²と少なく、同じ内部水面に位置するE護岸の現存量に比べ1/2以下であった。2010年になると2期島のF護岸（①）の現存量もI、J護岸の現存量と同じように増加し、2期島外周護岸（F、H、I、J）の現存量は0.83～1.39kg w.w./m²となった。総現存量に占めるカジメ属の割合もI護岸を除き概ね1/2であった。E護岸の現存量は0.45kg w.w./m²で、2006年に比べ

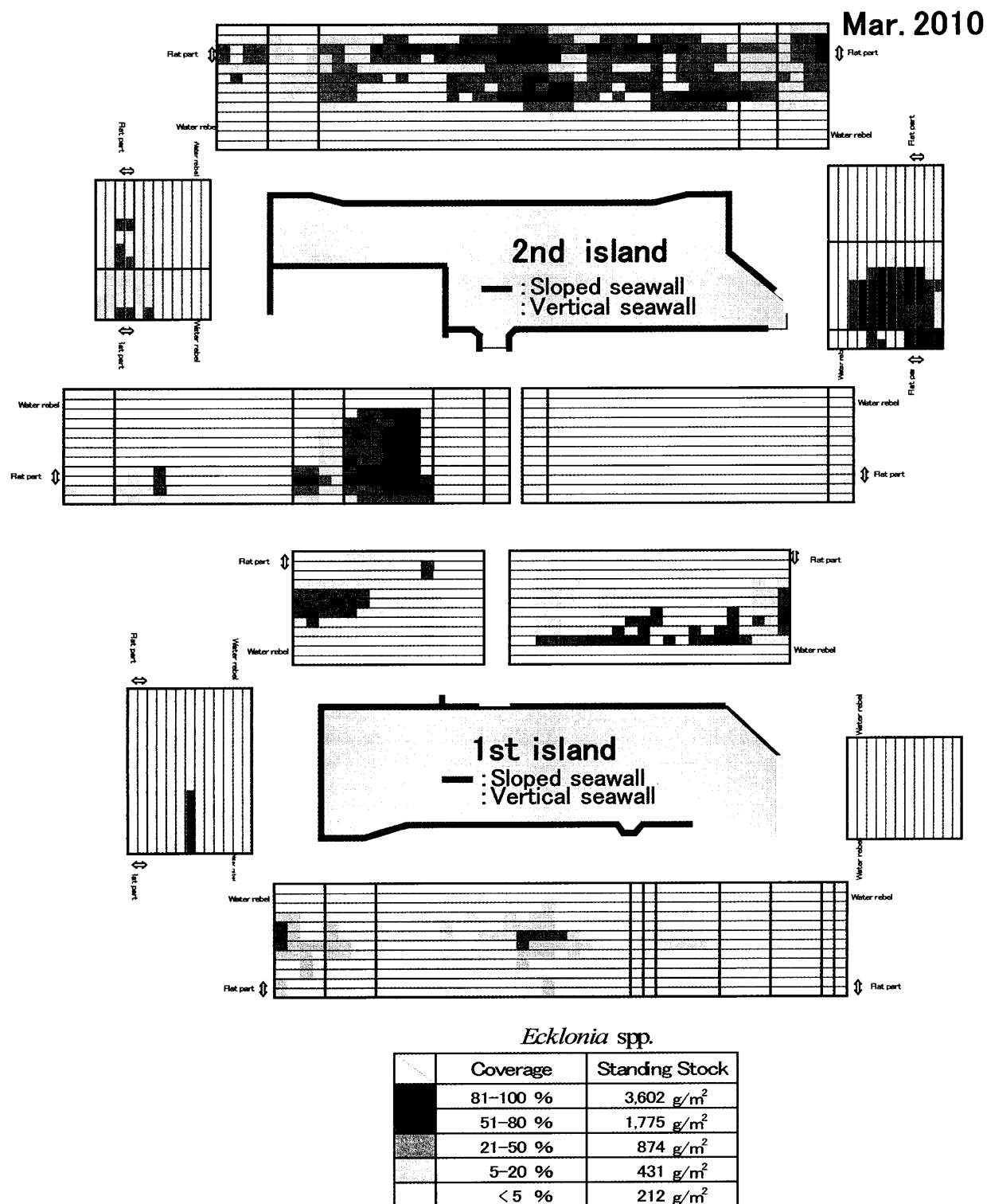


Fig. 4 Relationship between degree of vegetation coverage (observed in March 2010) and wet weight of four main species of seaweed.

1.4倍に増加したが、G護岸の現存量は0.14kg w.w./m²で、2006年から増加しなかった。なお、直立護岸であるA護岸(③)の現存量は、各年とも全護岸中で最も小さく、2010年の現存量は0.09kg w.w./m²であり、もっとも現存量が多かったI護岸の現存量に比べ1/15以下であり、カジメ属の出現はなかった。

4) 空港島周辺海域の海域環境

水質およびRpfの測定値および平均値(標準誤差)をTable 1に示した。水温は8.4~28.7℃、塩分は28.1~32.5、pHは7.9~8.5、クロロフィルaは0.5~12.0 μg/l、SSは0.8~3.5mg/l、DINは0.025~0.203mg/l、PO₄-Pは0.003~0.032mg/lの範囲にあった。このうち塩分はSt.1とSt.2、3の間に、pHはSt.2とSt.3の間に、DINはSt.1とSt.3の間に有意差が認められた($p<0.05$)。Rpfの海面下1m、3m、

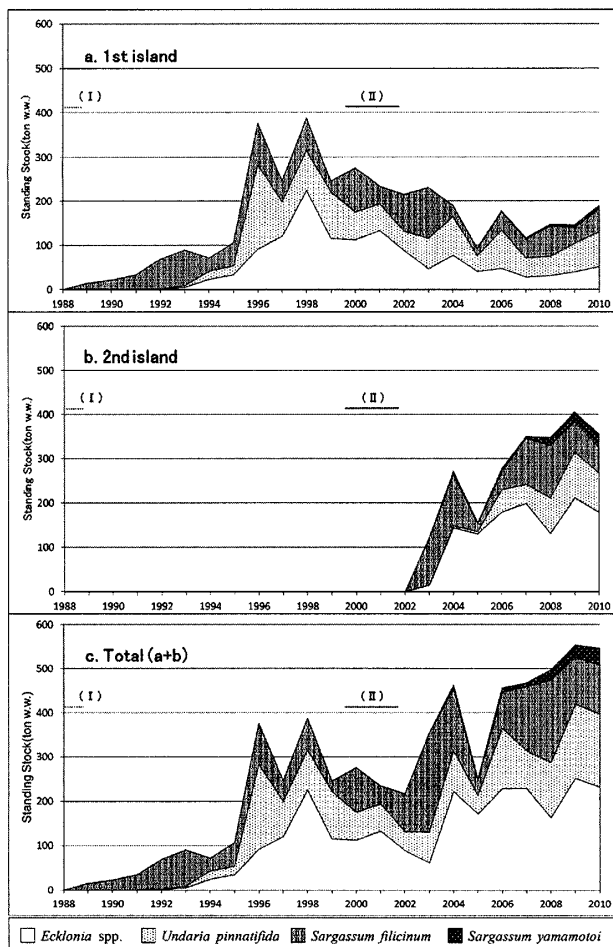


Fig. 5 Changes in standing stock of four main species of seaweed around the airport islands.

(I) and (II) show the first and second phase airport island development periods, respectively. Graph (a) shows the standing stock of the first phase airport island, (b) the standing stock of the second phase airport island, and (c) the standing stock of (a) and (b) combined.

5m, 7m層はそれぞれ24.1~82.8%, 3.5~53.2%, 2.6~28.1%, 1.7~14.8%の範囲にあり, 各層ともSt.1が大きく, 次いでSt.3, St.2であり, 各層間の各地点間に有意差は認められなかった ($p < 0.05$).

流向・流速の比較をFig. 7に示した。流向はMT局では南北方向の往復流であり, St.2では南西を示し, St.3では明瞭な流向は見られなかった。平均流速はMT局で26.7cm/s, St.2で27.3cm/s, St.3で4.7cm/sであった。St.2は測定年が異なっているものの, St.3の流速は, MT局およびSt.2の流速に比べ1/5以下であった。

5) 主要4海藻の現存量

空港島護岸全体における2010年3月の主要4海藻の現存量(湿重量), C, N, Pベースの現存量をTable 2に示した。

海藻ごとのC, N, P含有量は, カジメ属では, それぞれ $381 \pm 7 \text{ mgC/g d.w.}$, $21.0 \pm 0.8 \text{ mgN/g d.w.}$, $1.64 \pm 0.06 \text{ mgP/g d.w.}$, ワカメでは, それぞれ $409 \pm 1 \text{ mgC/g d.w.}$,

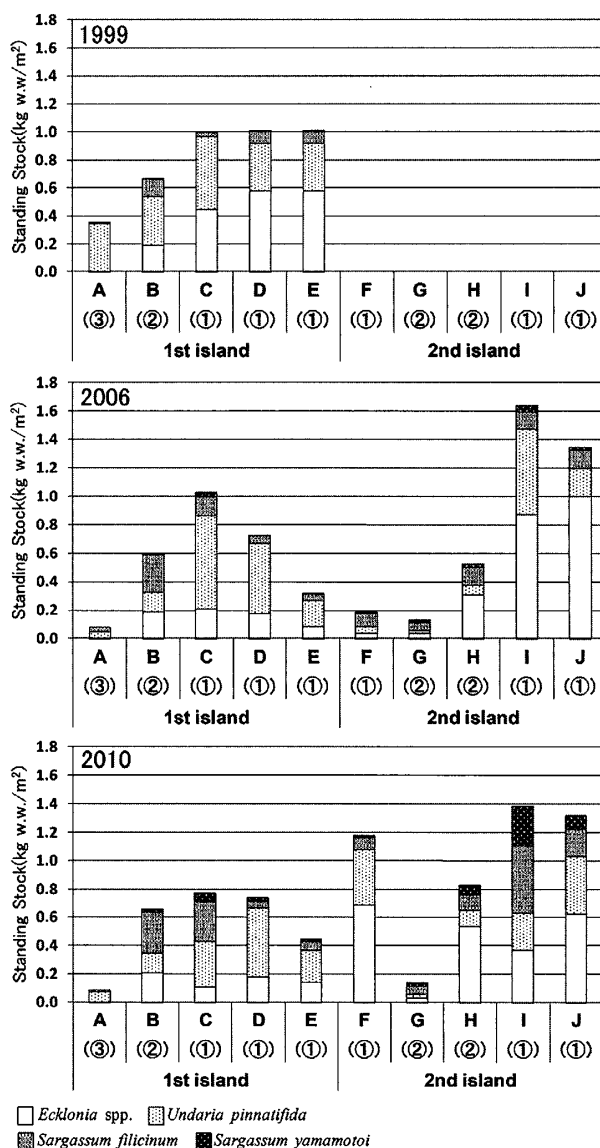


Fig. 6 Standing stock of four main species of seaweed per area of respective seawalls in 1999, 2006 and 2010.

$31.4 \pm 0.9 \text{ mgN/g d.w.}$, $3.07 \pm 0.20 \text{ mgP/g d.w.}$, シダモクでは, それぞれ $417 \pm 2 \text{ mgC/g d.w.}$, $23.7 \pm 1.2 \text{ mgN/g d.w.}$, $1.51 \pm 0.06 \text{ mgP/g d.w.}$, ヨレモクモドキでは, それぞれ $396 \pm 12 \text{ mgC/g d.w.}$, $16.1 \pm 0.7 \text{ mgN/g d.w.}$, $1.09 \pm 0.03 \text{ mgP/g d.w.}$ であった。2010年の空港島傾斜護岸帯全体のC, N, Pベースの現存量は, それぞれは20,509kgC, 1,148kgN, 87kgPであった。

4. 考 察

1) 大型海藻の植生被度ランクと湿重量との関係

関西空港島護岸における藻場で, 面積の変化として示されてきた藻場の推移を, 本研究でははじめて現存量の変遷として示した。金子ら¹¹⁾は, 本研究と同一場所において藻場現存量にウニ類の密度が与える影響を調べるため, 海藻種の被度と藻体の高さから現存量を換算する直線回帰式を求めている。しかし, 本研究で取得したデー

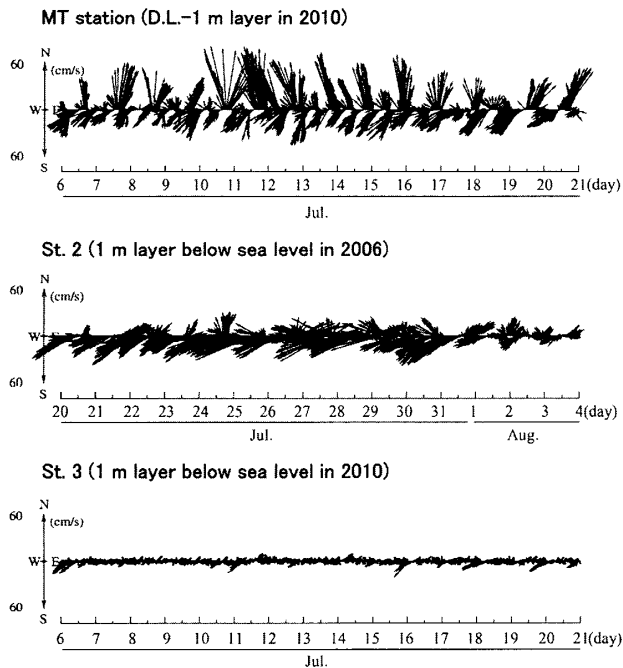


Fig. 7 Flow direction and flow velocity in 1 m layer below sea level in July at three points (MT station, St. 2, and St. 3).

タは植生被度ランクのみであり、藻体の高さをデータとして必要とする金子らの関係式は使用できなかった。

そこで本研究では新たに主要4海藻の植生被度ランクと湿重量の関係式を求めたところ、決定係数 (R^2) が0.80以上を示す精度の高い指数曲線式で近似できた。金子らの直線回帰式は、小型海藻についての決定係数 (R^2) は高く、被度と現存量の関係を良く表しているが、大型海藻、特に最も優占するカジメ属については決定係数 (R^2) が0.49と小さかった。大型海藻は被度が高くなるにつれ株が大型化し、護岸上に立体的に繁茂した状態になることから、大型海藻の植生被度と湿重量との関係は、植生被度に対して現存量が指数関数的に増加する指数曲線式が適していたと考えられる。

2) 主要4海藻の出現の推移

Fig. 5に示すように、1期島護岸の藻場は、モニタリング開始時には一年生のシダモクが優占種であったが、護岸概成約8年後には多年生のカジメ属へ交代した。一年生の大型海藻から多年生の大型海藻への優占種の交代は、海藻の遷移過程に一般に観察される現象であるが^{12),13)}、2期島護岸の藻場は、優占種がカジメ属に交代するまでの期間が護岸概成後約2年(2004年)であり、1期島の遷移に比べかなり短かった。遷移の速度が1期島と2期島で大きく異なったことは、1期島護岸の母藻群落は遊走子の供給源となり、2期島護岸の完成とともに速やかに遊走子の供給が行われたためであると考えられた。1期島の藻場が最大現存量に達するまでの期間は、護岸概成後約9年であったのに対し、2期島では護岸概成後約7年と短かったことも、そのためであると考えら

れる。藻場再生を目的とした人工構造物を設置するうえで、流れ藻により種苗の供給を受けられないカジメ属の藻場を造成するには、ある程度の規模の母藻群落が隣接海域に存在することが、拡大に効果的であると考えられた。

3) 2期空港島造成が主要4海藻現存量に与えた影響

2010年の空港島の総護岸表面積(面積0.72km²)は、1期島の護岸表面積(面積0.29km²)に比べ約2.5倍になったが、2010年の総現存量(546.1ton)は、1期島の最大現存量(388.1ton)に比べ約1.4倍にとどまっている。これは2期島造成以降の1期島の総現存量、特に現存量で最大約60%を占めたカジメ属の減少によっており、その現存量が回復しないことに起因している。

各護岸1m²あたりの現存量の推移(Fig. 6)を見ると、直立護岸を除く1期島外周の各護岸(B~E)の現存量に占めるカジメ属の割合は、1999年には28~58%であったが、2期島造成後の2006年には20~31%、2010年には14~32%に減少した。一方、2期島外周の各護岸(F~J)の現存量に占めるカジメ属の割合は、2006年には20~74%、2010年には21~64%と、2期島造成前の1999年の割合とほぼ同じであり2期島が造成されたことにより、1期島のD、E護岸の現存量の減少が大きく、そのうちカジメ属の減少が大きかった。また新たに造成された内部水面に位置するG護岸では現存量の大きい藻場は形成されなかった。このように海藻の生育に配慮された傾斜護岸でありながら藻場が衰退したり形成されないことは今後同様な傾斜護岸帯の造成にとって重要な問題である。Table 1に示すように、内部水面(St.3)と北西に向いたJ護岸(St.1)および南東に向いたB護岸(St.2)の水質に有意差が認められた項目は、塩分、pH、DINであり、内部水面の塩分はJ護岸より若干低く、pHはB護岸より若干低く、DINはJ護岸より若干高かった。しかし、これらの水質項目データのいずれも海藻の生育を阻害するような値¹⁴⁾ではなかった。また、Rpfも護岸間で差が無かった。一方、Fig. 7に示すようSt.3の流速は4.7cm/sで、MT局およびSt.2の1/5以下の流速であった。

Hurd *et al.*¹⁵⁾は、カジメ属と同じコンブ目の海藻である*Macrocystis integrifolia*の窒素吸収速度と流水式水槽内の流速との関連性について調べ、6cm/s以下の流速になると海水中から藻類が吸収する窒素量が低下することを報告している。

また、空港島周辺海域における50年確率波^{7),8)}は、西側方向からの波動流動が強く、東側方向からの波動流動は若干弱く、内部水面内での波動流動は極めて弱い。中山ら¹⁶⁾は、大型海藻の分布と波浪及び流れの数値計算から、波動流動が強い場所には、アラメ(*Eisenia bicyclis*)・カジメ群落が優占し、波動流動の弱い場所にはホンダワラ類が優占することを報告しており、2期島造成により

Table 1 Water quality of 1 m layer below sea level, and observed values and mean values $\pm$ SE of relative photon flux in 1 m, 3 m, 5 m, and 7 m layers below sea level (n=12).

Variable	St.1	St.2	St.3
Watwr temperature(°C)	18.3 $\pm$ 1.8 (8.7~28.2)	18.1 $\pm$ 1.9 (8.4~27.6)	18.2 $\pm$ 1.9 (8.6~28.7)
Salinity	13.6 $\pm$ 0.2 ^b (29.7~32.4)	31.3 $\pm$ 0.3 ^a (28.1~32.5)	31.1 $\pm$ 0.3 ^a (29.5~32.2)
pH	8.2 $\pm$ 0.04 (8.1~8.5)	8.3 $\pm$ 0.04 ^b (8.1~8.5)	8.2 $\pm$ 0.05 ^a (7.9~8.5)
Chlorophylla(μ g/l)	8.3 $\pm$ 0.6 (1.3~7.3)	5.2 $\pm$ 1.0 (1.6~12.0)	4.0 $\pm$ 0.9 (0.5~10.0)
Suspended solids(mg/l)	2.3 $\pm$ 0.2 (1.0~3.1)	2.4 $\pm$ 0.2 (0.8~3.5)	2.2 $\pm$ 0.2 (0.8~3.3)
DIN(mg/l)	0.051 $\pm$ 0.01 ^a (0.025~0.118)	0.061 $\pm$ 0.02 (0.025~0.171)	0.078 $\pm$ 0.02 ^b (0.025~0.203)
PO ₄ -P(mg/l)	0.009 $\pm$ 0.002 (0.003~0.017)	0.009 $\pm$ 0.002 (0.003~0.016)	0.013 $\pm$ 0.003 (0.003~0.032)
Rpf(%)			
(-1m)	55.8 $\pm$ 3.6	51.9 $\pm$ 5.4	53.6 $\pm$ 3.4
(-3m)	26.1 $\pm$ 3.0	23.7 $\pm$ 3.2	25.4 $\pm$ 2.9
(-5m)	12.6 $\pm$ 1.6	11.7 $\pm$ 2.4	12.4 $\pm$ 1.4
(-7m)	7.2 $\pm$ 0.9	6.3 $\pm$ 1.3	7.0 $\pm$ 0.7

* Tukey, a<b

出現した内部水面では、静穏化が進んでカジメ属の生育に不適となり現存量に占めるカジメ属の割合が小さくなったと考えられた。

2期島が出来たことにより内部水面に位置することとなったE護岸(①), G護岸(②)を比較すると, 2010年のカジメ属の現存量は, 平坦なG護岸では0.03kg w.w./m²であり, 大きな凹凸があるE護岸の0.14kg w.w./m²に比べ1/5しかなく, 2006年から現存量の増加が見られない。また, G護岸と護岸形状および向きが同一であるが, より開放性の強い波除堤内水面に位置するH護岸(②)では2010年の護岸1m²あたりのカジメ属の現存量は0.53kg w.w./m²であり, G護岸に比べ18倍大きかった。また, G護岸と護岸形状および向きが同一だが, 開放水面に面した1期島のB護岸(②)では, 2010年のカジメ属の現存量は0.21kg w.w./m²で, G護岸に比べ7倍大きかった。

川崎ら¹⁷⁾は, カジメの遊走子の着生基盤表面に角度90度以上の突起物を設けると, その側面では遊走子の着生密度が高まり, その生存に影響する浮泥堆積量も少なくなることを報告している。流動の小さい内部水面では, 消波ブロックにより凸凹面の多いE護岸に比べ, 自然石に被覆され表面が平坦なG護岸では浮泥が堆積しやすく, カジメ属の遊走子の着生が阻害され藻場が形成されない可能性も考えられるが, 今後の詳細な検討が必要である。

2期島造成にあたり, 波動流動が改善されるよう内部水面の幅を持たせたり, 連絡誘導路の構造を流れを阻害しない橋梁方式を採用したり, 内側に面した傾斜護岸にも消波ブロックを設置するなどの生物面から見た空間的な構造を考慮して2期島が造成されていれば, 1期島の

藻場は現在ほど大きな減少はなかったと推測された。

4) 藻場の消長に影響を与える要因

本研究における藻場の短期的な消長に大きな影響を与えるものとして, 台風などによる波浪の影響が考えられる。Fig. 5に示すとおり, 2004年の総現存量は462.9ton w.w.であったが, 翌2005年には250.5ton w.w.に著しく減少した。2004年は記録的な頻度で台風, 低気圧が通過し, MT局の波高データの分析から, 海藻繁茂期前の秋から冬にかけて通過したT0416号, T0418号, 低気圧(T0427号崩れ)で, それぞれ592cm, 632cm, 458cmの最大波高を記録した(関西国際空港 未発表)。これらの台風, 低気圧の通過時に起きた擾乱により, 特にホンダワラ類が剥離, 流出したことにより2005年の現存量が減少したと推測された。翌2006年の現存量の急速な回復は, 2005年夏季が通常年に比べ水温が低かったことに加え, 2006年冬季の水温が低かったことで(関西国際空港 未発表), 大型海藻の生残と生長が良かったことや, 2004年の台風通過時の擾乱により, 海藻の着生基盤となる新しい裸面が傾斜護岸上に形成されたことによるものと推測された。台風による一過性のイベントは, 藻場の一時的な減少要因となるが, カジメ属への影響は多大ではなく, またホンダワラ類は残った藻場から流れ藻が供給され続ける限り, 空港島の藻場現存量は速やかに回復すると推測された。

5) 主要4海藻のC, N, P吸収量

Table 2に示した空港島護岸の主要4種のC含有量は広島湾^{18),19)}, 相模湾²⁰⁾に比べて大きいものの, N, P含有量はほぼ同じであった。一方, 大阪湾のDIN, DIP濃度は, それぞれ16.06 μ M, 0.52 μ Mであり²¹⁾, それぞれ

Table 2 Standing stock of seaweed beds in sloped seawall reef in March 2010, and annual production amounts of carbon, nitrogen, and phosphorus.

Species	Standing stock (ton w.w.)	Dry/wet weight ratio (d.w.%)	Carbon	Content		Standing stock			$P/B_{max}^{27)}$	Annual amount		
				Nitrogen (mg/g d.w.)	Phosphorus (mg/g d.w.)	Carbon (kgC)	Nitrogen (kgN)	Phosphorus (kgP)		Carbon (kgC/y)	Nitrogen (kgN/y)	Phosphorus (kgP/y)
<i>Ecklonia</i> spp	231.6	11.0	381 ± 7	21.0 ± 0.8	1.64 ± 0.06	9,706	535	42	1.1	10,677	589	46
<i>Undaria pinnatifida</i>	166.4	3.2	409 ± 1	31.4 ± 0.9	3.07 ± 0.20	2,178	167	16	2.4	5,227	401	38
<i>Sargassum filicinum</i>	110.4	12.8	417 ± 2	23.7 ± 1.2	1.51 ± 0.06	5,893	335	21	2.4	14,143	804	50
<i>S. yamamotoi</i>	37.7	18.3	396 ± 12	16.1 ± 0.7	1.09 ± 0.03	2,732	111	8	2.4	6,557	266	19
Subtotal	546.1					20,509	1,148	87		36,604	2,060	153
Small seaweeds	141.2	10.0	286	33.0	1.00	4,038	466	14	2.0	8,076	932	28
Total	687.3					24,547	1,614	101		44,680	2,992	181

* Mean ± SD

Table 3 Annual production amounts of carbon, nitrogen, and phosphorus per 1 m², 1m of sloped seawalls and vertical seawalls in March 2010.

Seawall type	Annual amount			Area and distance of seawalls observed		Annual amount					
	Carbon (kgC/y)	Nitrogen (kgN/y)	Phosphorus (kgP/y)	(m ²)	(m)	Carbon (gC/m ² /y)	Nitrogen (gN/m ² /y)	Phosphorus (mgP/m ² /y)	Carbon (gC/m ² /y)	Nitrogen (gN/m ² /y)	Phosphorus (mgP/m ² /y)
Sloped seawall	44,534	2,979	180.3	699,000	22,400	63.7	4.3	258	63.7	4.3	258
Vertical seawall	146	13	0.7	21,000	1,800	7.0	0.6	33	7.0	0.6	33
Total	44,680	2,992	181.0	720,000	24,200						

広島湾²¹⁾の2.8倍, 1.6倍, 相模湾²²⁾の34.2倍, 10.4倍と高い傾向にあった。

Asare *et al.*²³⁾やWheeler *et al.*²⁴⁾は, カラフトコンブ (*Laminaria saccharina*), ジャイアントケルプ (*Macrocystis pyrifera*) などの葉体のN, P含有量は, 海水中のDIN, DIP濃度と相関する場合が多いと報告しているが, 大阪湾ではそのような傾向は見られなかった。

蒲原ら²⁵⁾は, 伊勢湾東部沿岸においてサガラメ群落の持つ水質浄化機能を評価するため, 年間生産量を求め, 海中からのC, N吸収量とした。

空港島護岸では, 海藻の生活型ごと²⁶⁾の P/B_{max} (年間生産量/年最大現存量) が求められている²⁷⁾。今回, 繁茂期の植生被度から現存量へ換算した値を年間最大現存量 B_{max} と見なし, 文献値の P/B_{max} を乗ずることで蒲原ら²⁵⁾と同様に年間生産量 (年間吸収量) を推定した。カジメ属は1.1, ワカメ, シダモク, ヨレモクモドキは2.4とした。空港島に繁茂する小型海藻類は, ツノマタの2.0を代表とした。その際, 小型海藻であるが比較的藻場の面積が広いアオサ属 *Ulva* spp., マクサ *Gelidium elegans*, ベニスナゴ *Schizymenia dubyi*, ススカケベニ *Halarachnion latissimum*, ツノマタ *Chondrus ocellatus*, イギス科 *Ceramiales* についても, 金子ら¹¹⁾による方法で植生被度から現存量へ換算した。小型海藻類の乾湿重量比は平均的な値である0.1とし, C, N含有量は小型海藻の中で最も藻場面積が広いツノマタの分析値を代表して用い (関西国際空港, 未発表), P含有量は0.05~1%以上の範囲で変動することから1%として試算した¹⁸⁾。

空港島護岸全体における2010年の主要4海藻によるC, N, Pの年間吸収量は, それぞれ36,604kgC/y, 2,060kgN/y,

153kgP/yで, 小型海藻類のC, N, Pの年間吸収量は, それぞれ8,076kgC/y, 932kgN/y, 28kgP/yで, 全体では44,680kgC/y, 2,992kgN/y, 181kgP/yであった。主要4海藻のC, N, P含有量に占める割合は, それぞれ約80%, 約70%, 約85%となり, 主要4海藻の消長が空港島の藻場が持つ水質浄化機能に大きく関わっていることが明らかになった。

次に護岸タイプによるC, N, P年間吸収量の比較のため, 2010年3月の傾斜護岸 (B~J), 直立護岸 (A) の1m²あたりのC, N, Pの年間吸収量をTable 3に示した。傾斜護岸平均のC, N, Pの年間吸収量は, それぞれ63.7gC/m²/y, 4.3gN/m²/y, 258mgP/m²/yであった。一方, 直立護岸は, それぞれ7.0gC/m²/y, 0.6gN/m²/y, 33mgP/m²/yであったことから, 傾斜護岸は直立護岸に比べ, それぞれ9倍, 7倍, 8倍の年間吸収量を有することが明らかになった。

大阪湾では1978年から1990年までの間に 2.10×10^6 m² (33%) の藻場が消滅した²⁾。地球温暖化に関連するC量について見ると, この大阪湾で消失した藻場が吸収していた年間のC量は文献値²⁸⁾から252.9tonC/yと推測された。空港島の藻場で吸収される年間C吸収量 (2010年) は44.7tonC/y (Table 2) であることから, 大阪湾で消失した藻場が吸収していたC量の18%を, 空港島の藻場が吸収していることになる。

6) 単位護岸距離が持つ水質浄化機能の経済的評価

従来, 海藻群落の機能を評価するC, N, Pの年間吸収量は, 単位面積あたりで評価されることが多かった^{25), 29)}。しかしながら, 埋め立て背後地を防護する目的から施工される傾斜護岸帯は, 目的とした海藻の生育・繁茂に適

した海域環境や場所に生育基盤を整備する藻場造成と異なり、海藻が繁茂する潮間帯から漸深帯を含む海面上部から海底まで連続施工される。このような場所では、小型海藻から大型海藻、一年生から多年生を含む複合藻場が形成されている。水深帯によりその種類や現存量が大きく違う傾斜護岸帯の海藻群落の生態学的機能を、従来の単位面積あたりの値により評価することは不十分であると考えられた。また、港湾構造物の設計・施工にあたっては単位面積あたりではなく、護岸延長で表されることが殆どである。そこで空港島の傾斜護岸帯に造成された藻場の観察面積を護岸延長で除することで、工事施工単位に対応した単位距離 (m) あたりのC, N, Pの吸収量を求めた (Table 3)。

この原単位を基に関西空港島の傾斜護岸帯の藻場におけるN, Pの吸収量と、下水道施設の処理量とで経済性の比較を行った。嫌気無酸素好気法により日最大処理水量 $200 \times 10^3 \text{ m}^3/\text{day}$ を処理する下水道施設の建設に要する費用は、下水道高度処理施設の費用関数から³⁰⁾、建設費は430億円、年間維持管理費は9.5億円と試算された。また、この高度処理方法による全窒素 (T-N)、全リン (T-P) の処理能力は、1lあたりそれぞれ8~10mg/l, 0.8~1.2 mg/lであることから³⁰⁾、比較にあたりそれぞれ9mg/l, 1mg/lとした。この処理量値に日最大処理能力を乗じて試算した1日あたりのT-N, T-Pの処理量は、それぞれ1800kgN/day, 200kgP/dayであり、これに、年間処理日数 (365日) を乗じることで、この施設におけるT-N, T-Pの年間処理量は、それぞれ657tN/y, 73tP/yと試算された。施設の建設費を年間処理量で除すると、1kgの窒素、リン量の処理に要する建設費は、それぞれ65,000円/kg, 590,000円/kgであった。また、年間維持管理費を年間処理量で除すると、1kgの窒素、リン量の処理に要する年間維持管理費は、それぞれ1,450円/kg, 13,000円/kgであった。大阪湾の海岸471kmのうち389kmが人工海岸で、そのほとんどが直立護岸であることから、1kmの直立護岸を緩傾斜護岸へ改良すると、年間吸収する炭素、窒素、リン量は、それぞれ1,907kgC/km/y, 126kgN/km/y, 7.6kgP/km/y増大させると試算された。これを下水処理施設の建設費に換算すると窒素処理量で年間820万円、リン処理量で450万円の便益が生じ、毎年必要な年間維持管理費に換算して窒素処理量で年間18万円、リン処理量で10万円の便益も生じると推測される。護岸の使用可能年数を考慮すればかなりの便益が発生すると考えられ、今後、新たな護岸建設や改良時にはこれら便益を考慮することが望まれる。

傾斜護岸の機能を向上させるためには、構造上可能な限り閉鎖水域とならないように外部との海水交換を良くすること、流動場が停滞することが予測される場合は護岸形状に凹凸を持たせることが必要であると考えられた。

また、直立護岸を傾斜護岸に改良することによる生態系機能の向上を定量化することができた。今後は、傾斜護岸帯の藻場が提供する生態系サービスを、従来の護岸の機能である防護、利用に付加したうえで、ライフサイクルコストとしての経済性を評価していく予定である。

謝 辞

本研究を実施するにあたりご協力を頂いた関西国際空港株式会社、ならびにデータの取得にご協力頂いた、いであ株式会社の各位に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) 水産庁：平成23年度水産白書, p.114, 2011
- 2) 環境庁自然保護局・財団法人海中公園センター：第4回自然環境保全基礎調査海域生物環境調査報告書 (干潟・藻場・サンゴ礁調査), 第2巻藻場：200, 1994.
- 3) 森政次・野田頭照美・新井洋一：人工護岸の造成とその生物的效果について, 沿岸海洋研究ノート, 29(1)：37-50, 1991.
- 4) 中村充・加藤久晶・吉田和久・芳我幸雄：関西国際空港護岸における藻場造成事例とその生物的效果について (その1), 瀬戸内海, 9：77-85, 1997
- 5) 尾崎正明・伊藤利加・奥田泰永・二宮早由子：関西国際空港島護岸の藻場造成による環境創造効果について, 土木学会, 海岸工学論文集, 47：1196-1200, 2000.
- 6) 阪上雄康・浅山英章・北沢壮介：関西国際空港2期空港島における藻場造成について, 海洋開発論文集, 19：13-18, 2003.
- 7) 関西国際空港株式会社：関西国際空港埋立造成工事誌, 空港島建設工事誌作成委員会編, 関西国際空港株式会社, p.397, 1994.
- 8) 関西国際空港株式会社建設事務所：Ⅱ 設計および新技術の導入, 2期空港島護岸工事誌, 関西国際空港株式会社, pp.8-18, 2003.
- 9) 日本規格協会：JIS K 0102, 1998.
- 10) オーエムエス出版：4Steps エクセル統計 (第2版), オーエムエス出版, 2004
- 11) 金子健司・豊原哲彦・藤田種美・米田佳弘・中原紘之：大阪湾の人工護岸上に形成された海藻群落の維持と高密度に生息するウニ類の摂食活動, 日水誌, 73：443-453, 2007.
- 12) 片田 実：海藻の生活形と遷移 (総述), 日水誌, 29：798-808, 1963.
- 13) 芹澤如比古・大野正夫：土佐湾の外海域に設置した人工礁上に着生する海藻類の遷移, 日水誌, 61：854-859, 1995.
- 14) 社団法人水産資源保護協会：海域が海藻類に及ぼす影響を判断するための判断基準と事例, 社団法人水産資源保護協会, p.104, 1992.
- 15) Hurd.C.L., Harrison.P.J., and Druehl.L.D., : Effect of seawater velocity on inorganic nitrogen uptake by morphologically distinct forms of *Macrocystis*

- integrifolia from wave-shelleted and exposed sites. Mar. Biol., 126 : 205-214, 1996.
- 16) 中山哲蔵・榎本一徳・灘岡和夫・内山雄介・中瀬浩太・島谷 学・星野高士・月舘真理雄：興津湾における広域海藻分布と水理環境に関する現地調査. 土木学会, 海岸工学論文集, 48 : 1161-1165, 2001.
 - 17) 川崎保夫・寺脇利信・長谷川 寛・平口博丸・後藤 弘・荒木 洋・飯塚貞二：海中林造成技術の実証 第3報 三浦半島西部における造成技術. 電中研研報, U91023 : p.37, 1991.
 - 18) 吉田吾郎・内村真之・吉川浩二・寺脇利信：広島湾に生育する海藻類の炭素・窒素含有量とその季節変化. 瀬戸内水研報, 3 : 53-61, 2001.
 - 19) 吉田吾郎・新村陽子・樽谷賢治・浜口昌己：海藻類の一次生産と栄養塩の関係に関する研究レビューーおよび瀬戸内海藻場の栄養塩環境の相対評価ー. 水研センター研報, 34 : 1-30, 2011.
 - 20) 山田佳昭・木下淳司：人工リーフに生育したカジメの炭素、窒素及びリン含有量. 神奈川県環境科学センター業務報告 (2004年版), pp.89-92, 2004.
 - 21) 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所：瀬戸内海ブロック浅海定線調査観測30年成果. 独立行政法人水産総合研究センター瀬戸内海区水産研究所, p.197, 2005.
 - 22) 山田佳昭・松下訓：相模湾沿岸域の環境の特徴, 水産海洋研究, 69 : 208-212, 2005.
 - 23) Asare, S. O. and Harlin, M. M. : Seasonal fluctuations in tissue nitrogen for five species of perennial macroalgae in Rhode Island Sound. J. Phycol., 19 : 254-257, 1983.
 - 24) Wheeler, P.A. and North, W.J. : Nitrogen supply, tissue composition and frond growth rates for *Macrocystis pyrifera* off the coast southern California. Mar. Biol., 64 : 577-582, 1981.
 - 25) 蒲原 聡・服部克也・原田靖子・和久光靖・芝修一・倉島 彰・前川行幸・鈴木輝明：伊勢湾東部沿岸サガラメ群落における年間純生産量と炭素・窒素の年間吸収量. 日水誌, 75 : 1027-1035, 2009.
 - 26) 米田佳弘・藤田種美・中原紘之・豊原哲彦・金子健司：大阪湾の人工護岸域に形成された海藻群落の維持に及ぼすウニ類の影響ーウニ類の密度操作による海藻群落の変化ー. 日水誌, 73 : 1031-1041, 2007.
 - 27) 金子健司・米田佳弘：5.6混生群落の海藻の生産力推定方法. 藤田大介・村瀬 昇・桑原久実 (編) 磯焼け対策シリーズ3 藻場を見守り育てる知恵と技術. 成山 堂, 東京, pp.129-136, 2010
 - 28) 独立行政法人森林総合研究所：森林、海洋等におけるCO2収支の評価の高度化. 独立行政法人森林総合研究所, pp.104-107, 2004.
 - 29) 木下淳司：人工リーフへのカジメ藻場移植と群落の拡大に関する研究. 水産工学, 45 : 169-178, 2009.
 - 30) 社団法人日本下水道協会：流域別下水道整備総合計画調査指針と解説. 流域別下水道整備総合計画制度設計会議編, 社団法人日本下水道協会, p.285, 2008.